



# Prediksi Kebisingan *Airframe* Pesawat Terbang Dengan Aplikasi *Ffowcs Williams And Hawkings Equation*

Aprilia Sakti K.<sup>1</sup>, Harry Sudiby<sup>2</sup>, Santoso Soekirno<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknologi Kedirgantaraan, Unsuraya, Jakarta, Indonesia

<sup>2</sup>Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

<sup>3</sup>Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

e-mail : [apriliask@yahoo.com](mailto:apriliask@yahoo.com)

**Abstrak** - Untuk mereduksi kebisingan dari *airframe* pesawat terbang, dilakukan pemodelan dengan prediksi pendekatan. Aplikasi *Ffowcs Williams and Hawkings Equation* (FWH) adalah salah satu pendekatan teoritis yang dapat dilakukan. Jika sudah ada suatu simulasi aerodinamika dari suatu bentuk dan kondisi *airframe* suatu pesawat, aplikasi persamaan tersebut akan mengintervensi model simulasi aerodinamika yang sudah ada. Parameter simulasi aerodinamika *airframe* pesawat terbang terdiri dari kerapatan fluida, kecepatan aliran, distribusi tekanan, dan turbulensi. Tulisan ini menganalisis kesesuaian data simulasi aerodinamika suatu *airframe* pesawat terbang, dengan persamaan FWH. Hasil analisis akan menjadi referensi dalam penggunaan persamaan FWH untuk diaplikasikan pada simulasi aerodinamika *airframe* pesawat terbang untuk memprediksi kebisingan. Parameter yang digunakan pada pemodelan dengan aplikasi persamaan FWH mencakup semua parameter aerodinamika,  $\rho$ ,  $v$ ,  $p$ , dan komponen turbulensi, dengan merepresentasikan radiasi kebisingan oleh sumber getaran yang menjalar dalam bentuk monopole, dipole, dan quadrupole. Dan dengan menganalogikan aplikasi persamaan serupa untuk simulasi jet noise, maka disimpulkan metode ini dapat dilakukan untuk simulasi aerodinamika *airframe* pesawat terbang.

**Kata Kunci**— kebisingan *airframe*, *Ffowcs Williams and Hawkings Equation*, aeroakustik

## I. PENDAHULUAN

**A**irframe pesawat terbang mempunyai karakteristik bunyi yang cukup signifikan. Di dalam perkembangannya, kebisingan *airframe* menjadi menarik untuk diteliti. Hal ini karena mesin, sebagai komponen kebisingan utama pesawat terbang, sudah mengalami perkembangan penurunan kebisingan yang sangat berarti. Di awal operasionalnya yang mencapai 150 dB, kini sudah dapat direduksi sampai sekitar 70 dB. Penurunan ini membuat kebisingan *airframe* muncul sebagai permasalahan baru yang dapat dikembangkan solusinya.

Tujuan dari mempelajari kebisingan tentunya adalah untuk menurunkan paparannya. Selain efek terhadap lingkungan dan makhluk hidup di sekitarnya, daya yang muncul sebagai bunyi diharapkan dapat menjadi daya guna yang meningkatkan efisiensi. Untuk melakukan reduksi kebisingan pada *airframe* pesawat, yang dilakukan oleh para peneliti adalah membuat prediksi paparan kebisingan yang muncul dari suatu struktur pesawat terbang.

Pendekatan dapat dilakukan dengan dua cara yaitu praktis dan teoritis. Pendekatan praktis dilakukan pada saat bagian pesawat yang sudah ada akan direduksi kebisingan yang ditimbulkan dari permukaan strukturnya. Bentuk yang sudah ada dibuat modelnya untuk diuji dan direduksi

kebisingannya dengan modifikasi bentuk, material, atau penambahan dan pengurangan bagian-bagiannya. Teoritis biasanya dilakukan pada perancangan awal pesawat terbang. Pendekatan ini memerlukan persamaan aerodinamika dan aeroakustik yang tidak sederhana.

Tulisan ini merupakan bagian dari penelitian yang disusun untuk memodifikasi desain aerodinamika pesawat buatan PT Dirgantara Indonesia. Di dalam tulisan ini akan dilakukan pendekatan akustik praktis dari simulasi aerodinamika airframe pesawat tersebut. Persamaan yang akan diaplikasikan adalah *Ffowcs Williams and Hawkings Equation*.

## II. LANDASAN TEORI

Sifat gelombang bunyi yang muncul akibat getaran suatu benda padat telah dikembangkan dalam cabang ilmu akustik. Namun untuk benda padat yang bergerak di dalam fluida dengan kecepatan tinggi, harus dikembangkan dari aerodinamika yang kemudian masuk ke cabang ilmu aeroakustik. Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa analisis kebisingan suatu obyek, dimulai dengan membuat prediksi atau model kebisingan itu sendiri. Dalam hal airframe pesawat terbang, pendekatan ini cukup memenuhi mengingat bahwa kebisingan dapat didekati dengan memprediksi amplitudo gelombang bunyi yang muncul akibat benda padat yang bergerak dengan kecepatan tinggi di dalam fluida.

Solusi dari permasalahan kebisingan dengan karakteristik seperti ini mulai terlihat pada saat Lighthill menuliskan tentang teori dasar aeroakustik, yaitu bunyi yang timbul secara aerodinamik<sup>[1]</sup> dan bunyi yang timbul akibat turbulensi<sup>[2]</sup>. Persamaan yang dirumuskan oleh Lighthill adalah penurunan dari persamaan kontinuitas aliran (Persamaan 1), persamaan momentum (Persamaan 2), dan aplikasi tensor tekanan (Persamaan 3) pada permukaan benda padat. Hal ini menghasilkan persamaan untuk sumber dengan medan bunyi berbentuk quadrupole.

Jika rerata kerapatan fluida dinyatakan sebagai  $\rho$ , waktu sebagai  $t$ , posisi sebagai  $x$ , dan kecepatan sebagai  $v$ , di mana indeks  $i$  menunjukkan arah dari vektor posisi dalam koordinat ruang, maka persamaan eksak dari kontinuitas aliran fluida dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad (1)$$

Sedangkan persamaan momentum sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + c_0^2 \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

dengan  $c_0$  adalah laju gelombang suara di dalam fluida.

Radiasi kebisingan dapat disederhanakan menjadi bentuk-bentuk pola umum yang dapat dijadikan pendekatan dalam perhitungan praktis<sup>[3]</sup>. Bentuk pola quadrupole biasanya dihasilkan oleh suara benturan, semburan jet, dan gesekan permukaan dengan fluida. Bentuk pola dipole biasanya dihasilkan oleh putaran baling-baling dan turbulensi dengan karakteristik tertentu. Selain meradiasi kebisingan dalam pola quadrupole, jet engine juga memiliki radiasi kebisingan dalam bentuk monopole. Persamaan FWH mempunyai komponen-komponen yang merepresentasikan semua pola radiasi tersebut.

Persamaan *Ffowcs Williams and Hawkings* (FWH) merupakan generalisasi dari teori dasar tersebut dan beberapa teori yang muncul setelahnya untuk diterapkan di berbagai obyek<sup>[4]</sup>. FWH adalah prediksi dari fluktuasi daya yang muncul sebagai gelombang bunyi, akibat getaran benda

padat di area fluida yang bergerak. FWH kemudian sering digunakan oleh peneliti untuk pendekatan praktis paparan kebisingan.

Bentuk integral dari persamaan FWH adalah :

$$4\pi c_0^2 \rho = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{[T_{ij}]}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} dV(\vec{r}_0) - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{[p_{ij}]}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} l_i dS(\vec{r}_0) + \rho_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{[v_i]}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} l_i dS(\vec{r}_0) \quad (3)$$

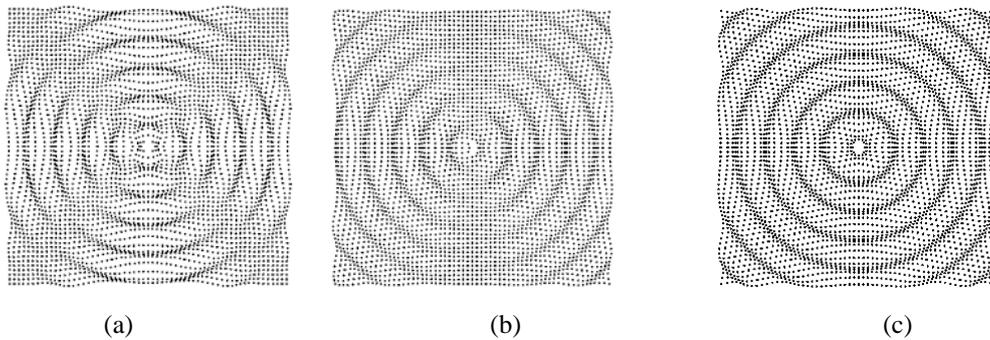
Suku pertama dari bentuk solusi persamaan ini merepresentasikan pancaran quadrupole dari gelombang bunyi yang dihasilkan. Pada suku tersebut, tensor tekanan  $T_{ij}$  diintegrasikan terhadap  $V$ , untuk suatu volume ruang sferis yang berjari-jari  $|\vec{r} - \vec{r}_0|$ , yaitu jarak sensor dari titik pusat sumber bunyi. Suku kedua merepresentasikan pancaran dipole dari gelombang bunyi, di mana tekanan  $p_{ij}$  diintegrasikan terhadap permukaan  $S$ , yaitu suatu permukaan yang melapisi volume  $V$ . Sedangkan suku ketiga merepresentasikan pancaran monopole, di mana kecepatan permukaan fluida  $v_i$  diintegrasikan untuk permukaan  $S$ .

Faktor  $l_i$  pada suku kedua dan ketiga adalah vektor normal dari volume  $V$ . Tensor tekanan  $T_{ij}$ , adalah tensor tekanan Lighthill yang dijabarkan sebagai persamaan<sup>[1]</sup> :

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + p_{ij} - c_0^2 \rho \delta_{ij} \quad (4)$$

di mana  $u$  adalah kecepatan volume fluida, dan  $\delta_{ij}$  adalah Delta Kronecker. Indeks  $i$  menunjukkan sumbu tiga dimensi pada koordinat ruang yang diamati, sedangkan  $j$  adalah sumbu tiga dimensi untuk setiap  $i$ .

Ilustrasi pancaran gelombang monopole, dipole dan quadrupole ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi pancaran gelombang quadrupole (a), dipole (b), dan monopole (c) dari sumber bunyi<sup>[5]</sup>

### III. PREDIKSI PADA AIRFRAME PESAWAT TERBANG

Pemodelan aerodinamika airframe pesawat terbang dibuat dalam perancangan badan utama dengan input berupa gambar (3D atau 2D) keseluruhan badan/fuselage pesawat, bentuk airfoil dari sayap yang biasanya diambil dari katalog NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), dan parameter-parameter fluida di permukaan bahan pesawat. Parameter ini adalah kerapatan udara, laju aliran, distribusi tekanan, dan turbulensi.

Diukur dari tingkat kebisingan yang dihasilkan, bagian airframe pesawat yang utama menghasilkan kebisingan adalah bagian *landing gear*. Hal ini disebabkan oleh permukaan yang tidak mulus, sehingga menimbulkan aliran udara di sela-sela bentuk geometrisnya. Bagian lain yang menimbulkan kebisingan adalah *high lift devices* yang bisa saja berbentuk airfoil sederhana, tetapi juga bisa airfoil yang terdiri dari *flap*, dan *slat* yang tidak sederhana. Komponen lain dari airframe pesawat yang bisa menimbulkan kebisingan adalah bagian-bagian yang dibuat tidak aerodinamis karena kepentingan tertentu, misalnya antenna dan lubang-lubang yang menghasilkan aliran udara sendiri.

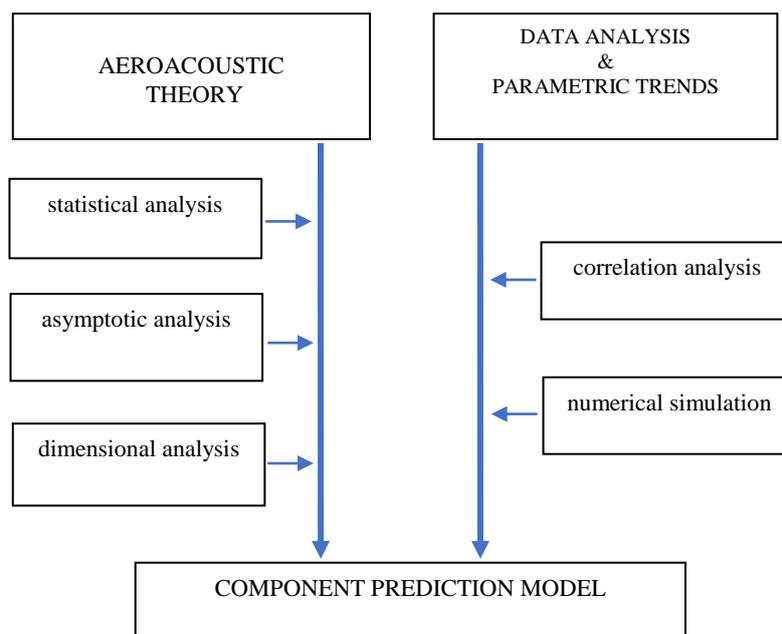
Pada prediksi ini, seluruh permukaan airframe pesawat terbang diasumsikan sebagai aliran tertutup dari fluida di sekitar sumber bunyi yang terbungkus lapisan permeable<sup>[5]</sup>. Asumsi ini menyederhanakan integral lapisan batas dalam membuat prediksi kebisingan yang ditimbulkan oleh variasi kerapatan udara, variasi laju aliran, distribusi tekanan, dan turbulensi, untuk mengaplikasikan persamaan FWH.

Metode ini mengambil referensi dari penelitian yang dipublikasi pada tahun 2013 oleh Mendez, et.al<sup>[6]</sup>. Pada penelitian tersebut, persamaan FWH diaplikasi pada simulasi *large-eddy* yang sudah jadi.

#### IV. DISKUSI

Pendekatan teknis untuk membuat prediksi kebisingan menurut Yueping Guo, dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu pendekatan teoritis dan pendekatan empiris<sup>[7]</sup>. Ilustrasi kedua metode tersebut digambarkan pada bagan di Gambar 2.

Pendekatan dengan persamaan FWH sebetulnya berada pada jalur teoritis, di mana selanjutnya perlu dilakukan analisis matematika. Dalam bagan pada Gambar 2, analisis yang bisa dilakukan adalah analisis statistik, asimptotik, atau dimensi, untuk mendapatkan pemodelan. Sedangkan pendekatan empirik memerlukan data dan parameter input untuk diproses dengan analisis korelasi atau simulasi numerik.



Gambar 2. Pendekatan teknis pemodelan kebisingan airframe pesawat menurut Yueping Guo<sup>[7]</sup>

Pada tulisan ini, data aerodinamik dan parameter pesawat sudah tersedia dalam bentuk simulasi numerik aerodinamika. Simulasi numerik ini merupakan simulasi numerik aerodinamika airframe pesawat dalam *coding* openFoam (dari *Open Source*) yang sudah memasukkan komponen aerodinamika, yaitu bentuk airframe, bentuk airfoil, kecepatan aliran fluida, tekanan, dan turbulensi. Dengan adanya data ini, pendekatan dapat dilakukan secara empiris. Pada simulasi ini, komponen kebisingan belum diperhitungkan.

Komponen aerodinamika yang tersebut di atas adalah komponen yang dimiliki oleh persamaan FWH dengan ketiga suku-sukunya. Tekanan dalam bentuk tensor direpresentasikan di suku pertama dengan integrasi terhadap volume  $V$ , dan tekanan yang berupa vektor diintegrasikan di suku kedua terhadap permukaan tertutup  $S$ , yang sebelumnya sudah diasumsikan sebagai lapisan permeable. Sedangkan kecepatan rambat diintegrasikan terhadap permukaan tertutup  $S$  pada suku ketiga.

Aplikasi persamaan FWH ke dalam simulasi dimaksud, merupakan analogi dari penelitian yang dilakukan oleh Mendez, et.al. pada tahun 2013<sup>[6]</sup>. Pada penelitian tersebut, persamaan FWH diaplikasikan ke simulasi yang sudah ada untuk memprediksi model kebisingan mesin jet.

Pada kenyataannya, berbagai penelitian yang melakukan kedua pendekatan tersebut, sulit mendapatkan kesesuaian dengan hasil eksperimen. Sementara masih dihipotesa bahwa pengondisian eksperimen masih belum ideal, misalnya acoustic treatment dari terowongan angin, ataupun akurasi mikrofon.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan kesesuaian variable antara parameter simulasi aerodinamika dengan persamaan FWH, maka dapat dilakukan aplikasi persamaan FWH tersebut ke dalam simulasi. Aplikasi persamaan FWH tersebut ke dalam simulasi aerodinamika yang sudah ada dari suatu airframe, merupakan modifikasi matematis untuk memprediksi kebisingan. Dalam algoritmanya kemungkinan memang dilakukan sedikit langkah mundur untuk mengubah persamaan dalam simulasi tersebut, yaitu mengganti persamaan aerodinamika yang sudah masuk dalam *coding*, dengan persamaan FWH.

Terdapat parameter-parameter yang bersesuaian antara simulasi aerodinamika, dengan persamaan FWH. Dan dengan menganalogikan penelitian oleh Mendez terhadap kebisingan yang dikeluarkan oleh mesin jet, maka aplikasi aeroakustik persamaan FWH, dapat dilakukan pada simulasi numerik aerodinamika yang sudah ada.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M.J.Lighthill, "On Sound Generated Aerodynamically: I. General Theory", *Proceeding of The Royal Society: Mathematical, Physical, and Engineering Science* Volume 211 Issue 1107, 1952  
diunduh dari : <http://rspa.royalsocietypublishing.org/> pada 23 Januari 2018
- [2] M. J. Lighthill, "On Sound Generated Aerodynamically: Turbulence as A Source of Sound", *Proceeding of The Royal Society: Mathematical, Physical, and Engineering Science* Volume 222, 1954
- [3] Russell, Daniel A., "Sound Field Generated by Simple Sources", Pennsylvania State University, 2001

- [4] Ffowcs Williams, J.E. and Hawkings, D.L., "Sound Generation by Turbulence And Surface In Arbitrary Motion", *Philosophical Transaction of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Science*, Vol.264, No. 1151, 1969
- [5] di Francescantonio, P., "A New Boundary Integral Formulation for the Prediction of Sound Radiation", *Journal of Sound and Vibration* Vol. 202, No.4, 1997
- [6] Mendez, S., Shoebly, M., Lele, S.K., Moin, P., "On the Use of the Ffowcs Williams-Hawkings Equation to Predict far-field Jet Noise from Large-Eddy Simulatioan", *International Journal of Aeroacoustic* Vol.12 No.1, 2013
- [7] Guo,Yueping., "Airframe Noise Modelling and Prediction", *Computational Experiment in Aeroacoustic Workshop* (not published), Russia, 2016



**Aprilia Sakti K., S.Si., M.Si.** berpendidikan S1 Astronomi dari Institut Teknologi Bandung Angkatan 1991 dan melanjutkan studi S2 Ilmu Fisika di Universitas Indonesia pada tahun 2001. Saat ini penulis sedang menempuh studi S3 di program studi yang sama. Bidang penelitian yang ditekuni saat ini adalah kebisingan pada pesawat terbang. Selain itu penulis juga pernah melakukan penelitian dan menyusun karya ilmiah tentang kurikulum, berkaitan dengan jabatan penulis di Fakultas Teknologi Kedirgantaraan, Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma. Karya ilmiahnya pernah dimuat di jurnal internasional terindeks Scopus, dan dipaparkan di seminar ilmiah nasional dan internasional.



**Prof. Dr. Ir. Harry Sudibyo, D.E.A.** adalah professor di bidang Teknik Elektro yang saat ini menjabat sebagai Guru Besar di Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Selain melakukan penelitian, Prof. Harry juga melakukan banyak pembimbingan terhadap mahasiswa S1, S2, dan S3 di lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Penelitian-penelitian baik yang dilakukan sendiri maupun bersama tim, sudah dipublikasikan di jurnal internal UI, dan/atau dipaparkan di berbagai konferensi nasional maupun internasional.



**Dr. Santoso Sukirno, M.Sc.** berpendidikan S1 dan S2 Fisika dari Departemen Fisika, Universitas Indonesia dan melanjutkan studi S3 di University of Besancon, Perancis, dengan bidang komponen LC. Indonesia pada tahun 2001. Saat ini penulis sedang menempuh studi S3 di program studi yang sama. Bidang penelitian yang ditekuni saat ini adalah sensor dan instrumentasi, yaitu bidang yang dikuasai sebagai dosen pengajar di Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia..